

# Desain Sumber Arus untuk *Electrical Impedance Tomography* (EIT)

Iwan Cony Setiadi

[cony.iwan@gmail.com](mailto:cony.iwan@gmail.com)

Sekolah Tinggi Teknologi Bontang

## Abstrak

**Electrical Impedance Tomography** adalah suatu metode pengukuran yang menggunakan konsep pencitraan (non-visual) yang sering digunakan pada dunia industri dan biomedis. Dalam EIT, terdapat dua bagian yang penting. Bagian penting itu yakni sumber arus dan perangkat koleksi data. Pada EIT, konsep dasar yang digunakan yakni pengukuran nilai resistivitas suatu objek. Proses pengukuran tersebut dilakukan dengan menginjeksi arus dan mengukur tegangan sesuai dengan prinsip dasar Hukum Ohm pada setiap elektrode. Dengan demikian, sumber arus adalah elemen terpenting dalam pada EIT. Pada penelitian kali ini, sebuah sumber arus akan coba dibuat dengan mengacu konsep *voltage control current source*. Sumber arus yang didesain memiliki amplitudo hingga 10 mA dan bisa bekerja secara optimal pada frekuensi 200 kHz. Sumber arus terdiri dari rangkaian sinyal generator, pengatur tegangan offset dan amplifier, dan rangkaian Howland. Sinyal generator dibuat berbasis Arduino dan modul AD9850 yang menggunakan konsep Direct Digital Synthesizer (DDS).

**Kata Kunci** — Letakkan kata kunci Anda di sini, kata kunci dipisahkan dengan koma.

## Abstract

**Electrical Impedance Tomography** is a measurement method that uses the concept of imaging (non-visual) who are often used in industry and biomedicine. In the EIT, there are two important part. They are the current source and the data collection device. In the EIT, the basic concept that used the measurement of the resistivity value of an object. The measurement process is done by injecting current and measuring the voltage in accordance with the basic principles of Ohm's Law at each electrode. Thus, the current source is the most important element in the EIT. In the study, a current source is made with the concept of Voltage Control Current Source. The current source has amplitude of up to 10 mA and can work optimally at frequency of 200 kHz. The current source consists of a series of signal generator, amplifier, voltage offset regulator, and a series of Howland. The signal generator is made based Arduino and AD9850 module that uses the concept of Direct Digital Synthesizer (DDS).

**Keywords** — AD9850, EIT, Sumber Arus, VCCS.

## I. PENDAHULUAN

*Electrical Impedance Tomography* adalah suatu metode pengukuran yang menggunakan konsep pencitraan (non-visual) yang sering digunakan pada dunia industri dan biomedis [1]. Dibandingkan dengan teknologi tomografi X-Ray ataupun

teknologi tomografi dengan menggunakan prinsip emisi positron, EIT jauh lebih murah, jauh lebih kecil, jauh lebih sederhana, dan tentu tak menimbulkan radiasi yang terkadang menimbulkan bahaya [2-4]. Pada dunia medis, penerapan teknik EIT sering digunakan pada identifikasi kondisi lambung dan fungsi paru-paru [9]. Pada dunia industri proses, EIT digunakan untuk mengamati dan menggambarkan distribusi minyak atau air pada pipa [5]. EIT juga kerap digunakan untuk menggambarkan suatu material tertentu dalam proses pencampuran di *mixing vessel* [6].

Pada teknik EIT, konsep dasar yang digunakan yakni pengukuran besar resistivitas suatu objek. Proses pengukuran tersebut dilakukan dengan menginjeksi arus dan mengukur tegangan sesuai dengan prinsip dasar Hukum Ohm pada setiap elektrode. Dengan demikian, sumber arus adalah elemen terpenting pada EIT. Besar arus yang diinjeksikan harus konstan terhadap perubahan impedansi atau resistivitas dari objek [8].

Sumber arus adalah sebuah piranti terminal yang dapat mempertahankan nilai arusnya tanpa terpengaruh oleh besar hambatan pada beban. Ada dua jenis sumber arus yakni *dependent* dan *independent*. Sumber arus independent atau sumber arus bebas adalah sumber arus yang besarnya pasti tidak tergantung dengan elemen lain pada rangkaian. Sedangkan sumber arus dependent atau tak bebas adalah sumber arus yang besarnya tergantung dengan elemen lain, misalnya tergantung pada sumber arus yang lain ataupun tegangan. Karena itu, sumber arus tak bebas ini sering juga disebut dengan *controlled current source* (sumber arus yang terkontrol) [8].

Pada EIT sumber arus yang sering digunakan adalah sumber arus bolak-balik (AC). Sumber arus bolak-balik yakni sumber arus yang polaritasnya berubah terhadap waktu. Jika dilihat, sebenarnya sumber arus bolak-balik sama saja dengan sumber arus searah pada proses pembuatannya. Perbedaannya adalah pada arus bolak-balik dibutuhkan sumber tegangan bolak-balik [7]. Pada umumnya sumber arus bersifat adjustable (bisa diatur nilai keluarannya sesuai dengan kebutuhan). Cara pengontrolan nilai arus yang keluar bisa menggunakan sumber arus, yang biasa dikenal *Current Controlled Current Source* (CCCS) ataupun sumber tegangan yang biasa dikenal dengan *Voltage Controlled Current Source* (VCCS). Namun, karena pembuatannya yang relatif, rumit CCCS kurang diminati dibanding VCCS. Hal demikian tentu beralasan karena pembuatan sumber tegangan lebih mudah.



VCCS adalah sebuah metoda untuk membuat sumber arus dengan mengontrol tegangan masukannya. Artinya besar arus yang dikeluarkan bergantung juga dari nilai tegangan. Jadi, jika kita menginginkan nilai arus yang adjustable maka yang dilakukan dengan mengubah besar tegangan masukannya. [7]. VCCS bisa dibuat dengan beberapa metoda yakni dengan konfigurasi OTA (*Operational Transconductance Amplifier*), differential amplifier, *Current Conveyor*, dan *Howland Circuit*.

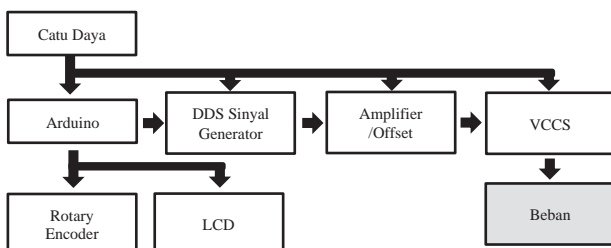
Pada VCCS arus searah bisa digunakan voltage regulator sebagai sumbernya, sedangkan pada arus bolak-balik biasanya menggunakan sinyal generator [7]. Sinyal yang digunakan bisa berupa sinyal AC bipolar yang memiliki puncak di fase negatif dan positifnya ataupun sinyal kontinyu dengan tegangan offset negatif atau positif. Sinyal yang digunakan yakni Sinusoidal, Persegi ataupun sinyal analog yang lain [7]. Ada beberapa teknik dalam pembuatan sinyal generator. Teknik tersebut yakni menggunakan rangkaian RC, menggunakan osilator, menggunakan FPGA (*Field Programmable Gate Array*), dan menggunakan DDS (*Direct Digital Synthesizer*). DDS adalah metoda yang sering digunakan karena berbasis sistem digital. Sistem digital memiliki keunggulan yakni tingkat akurasi dan presisi yang tinggi [8].

Pada penelitian kali ini, sebuah sumber arus akan coba dibuat dengan mengacu konsep VCCS. Sumber arus yang didesain memiliki amplitudo hingga 10 mA dan bisa bekerja secara optimal pada frekuensi 200 kHz. Sumber arus terdiri dari rangkaian sinyal generator, pengatur tegangan *offset* dan amplifier, dan rangkaian Howland. Sinyal generator dibuat berbasis Arduino dan modul AD9850 yang menggunakan konsep *Direct Digital Synthesizer* (DDS). Potensiometer, rotary encoder, dan LCD juga ditambahkan untuk memudahkan pengaturan. Sumber arus akan diuji dalam beberapa hal yakni, respon pembebanan, respon frekuensi, respon beban reaktif, dan pada objek EIT yang telah dikondisikan.

## II. METODOLOGI

### A. Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem pada perangkat sumber arus yang akan diteliti ini ditunjukkan oleh Gambar 1. User memberikan perintah untuk setup pada Arduino dengan bantuan interface. Pengguna memberikan data digital yang kemudian diproses dalam algoritma yang tertanam pada Arduino. Pin luaran pada Arduino terhubung dengan Modul DDS AD9850 yakni sebagai generator sinyal. Data dari user tersebut ditampilkan dalam representasi dari nilai frekuensi sinyal keluarannya.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

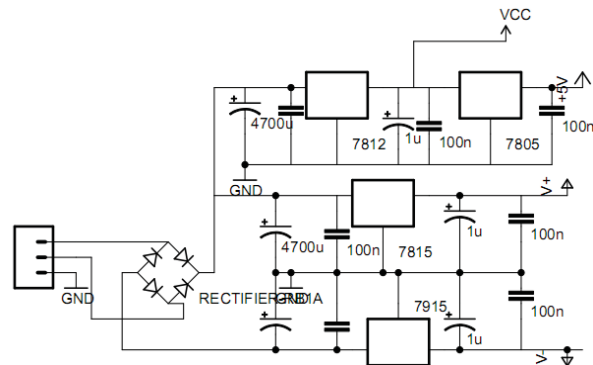
Modul DDS AD9850 memberikan dua jenis sinyal yakni sinusoidal dan persegi. Pada datasheet AD9850 amplitudo maksimalnya adalah 1Vpp untuk sinyal sinusoidal dan 5Vpp untuk sinyal persegi. Dengan demikian perlu diberikan rangkaian tambahan untuk menaikkan amplitudo hingga 20Vpp. Pengaturan *offset* juga perlu dikarenakan beberapa Op-Amp bermasalah terkait dengan *offset* yang tentu berpengaruh terhadap sinyal luaran. Sehingga dengan memberikan kompensasi, maka dibuatlah rangkaian untuk pengaturan *offset*. Sinyal luaran (tegangan) dari blok *amplifier* dan pengatur tegangan *offset* akan dikonversi menjadi arus oleh VCCS.

### B. Rangkaian Catu Daya

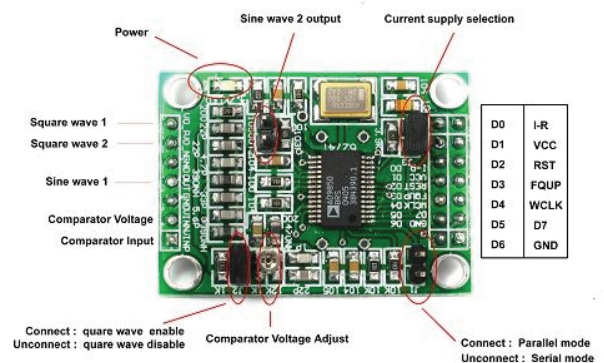
Catu daya yang dirancang yakni +/- 15 Volt, 12 Volt, dan 5 Volt DC. Nilai +/- 15 Volt digunakan untuk catuan Op-Amp, sedangkan 12 Volt dan 5 Volt digunakan untuk catuan komponen lain seperti Arduino. Gambar 2 di bawah ini adalah skematik rangkaian catu daya.

### C. Rangkaian Sinyal Generator

Perancangan sinyal generator menggunakan konsep DDS. DDS merupakan metoda untuk menghasilkan sinyal analog dengan sistem digital. DDS memiliki keunggulan dibandingkan dengan teknik membangkitkan sinyal lainnya yakni dalam hal reducibility, repeatability, reliability, akurasi, dan presisi. Variabel yang paling signifikan dalam pembuatan sinyal generator dengan konsep DDS adalah frekuensi. Secara umum arsitektur dasar dari DDS terdiri dari sumber *clock*, *counter*, *table look up*, *register* (memori), DAC, dan filter.



Gambar 2. Rangkaian Catu Daya



Gambar 3. Modul DDS AD9850

Salah satu modul DDS yang bisa digunakan untuk membuat sinyal generator adalah AD9850. Gambar 3 di atas adalah bentuk fisik DDS AD9850. Modul DDS AD9850 dihubungkan dengan kontroler arduino dengan dilengkapi *rotary encoder switch*. *Rotary encoder* digunakan untuk mengatur frekuensi yang dihasilkan. *Rotary encoder switch* inilah sebagai interface antara Arduino dan pengguna. Modul DDS AD9850 dirancang secara khusus dengan maksimal amplitudo 1Vpp untuk sinyal sinusoidal dan 5Vpp untuk sinyal persegi. Pada sinyal persegi dilengkapi pengaturan nilai *duty cycle*. Sinyal generator juga dilengkapi dengan LCD sebagai penampil nilai frekuensi untuk memudahkan setiap pengaturan besar frekuensi. Gambar 4 adalah skema rangkaian sinyal generator.

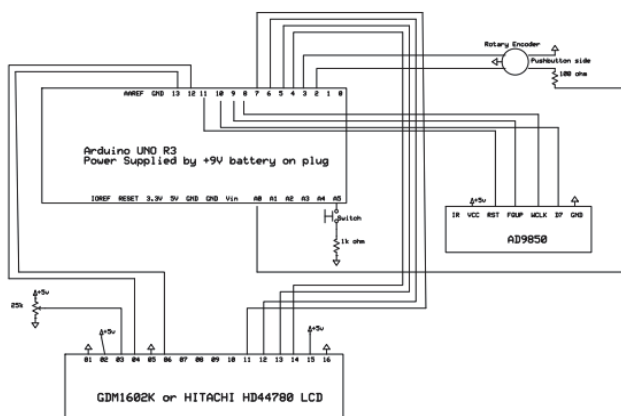
Nilai yang dihubungkan dari pin AD9850 ke Arduino yakni pin VCC, RST, FQUP, WCLK, D7. VCC terhubung dengan tegangan 3.3V. RST terhubung dengan pin reset. WCLK adalah nilai dari *clock* referensi yakni dalam modul ini sebesar 125 MHz. WCLK terhubung dengan pin digital 8 (D8). FQUP terhubung dengan pin digital 9 (D9). Untuk LCD terhubung dengan pin (12, 13, 7, 6, 5, 4). Sementara pin 2 dan 3 digunakan untuk interrupt yakni terhubung dengan rotary encoder switch. *Rotary encoder switch* adalah komponen masukkan untuk mengatur frekuensi yang dilengkapi dengan skala pengaturan. Apabila diputar ke kanan maka frekuensi bertambah, dan apabila ke kiri maka frekuensi berkurang. Nilai frekuensi diperoleh dari persamaan berikut :

$$f_o = \frac{M \cdot f_c}{2^n} \quad (1)$$

dengan nilai  $M$  menunjukkan nilai 32 bit dari banyaknya lompatan (*tuning word*).

#### D. Pengatur Tegangan Offset dan Rangkaian Penguat

Gambar 5 menunjukkan rangkaian pengatur tegangan offset dan penguat. Penguat yang dirancang adalah sebesar 4x yakni dengan nilai resistor yang masing-masing sebesar 1k dan 3k. Nilai offset tegangan yakni antara -15V dan 15V DC.

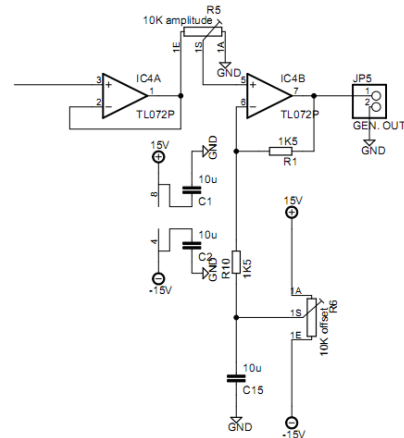


Gambar 4. Modul DDS AD9850

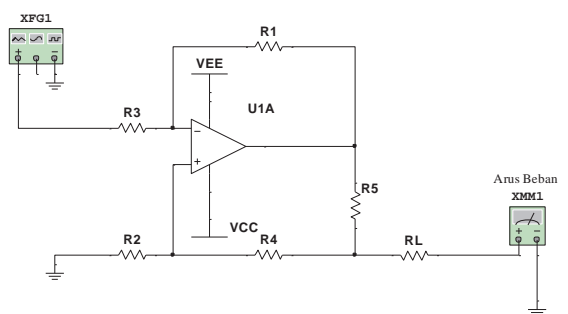
### E. Rangkaian VCCS

VCCS telah diteliti sejak beberapa puluh tahun yang lalu. Sebelum konsep IC (*Integrated Circuit*) ditemukan dalam pembuatan komponen elektronik, peneliti menggunakan *vacuum tube-based circuit* (*triodes dan pentodes*). Perkembangan teknologi dan lahirnya komponen Op-Amp memudahkan dalam pembuatan VCCS. Beberapa ahli telah melakukan riset, simulasi, dan pembuatan VCCS dengan menggunakan Op-Amp. Pada penelitian ini VCCS yang digunakan adalah rangkaian Howland Circuit. Konfigurasi ini pertama dikenalkan oleh Prof. Bradford Howland yakni seorang peneliti dari MIT. Gambar 6 di bawah ini adalah *Basic Howland Circuit*.

Nilai-nilai resistor pada Howland circuit biasanya dibuat sama untuk memudahkan konversi. Nilai tersebut yakni  $R_1=R_2=R_3=R_4$ . Sehingga dengan penurunan rumus otomatis yang berpengaruh terhadap nilai luaran arus hanya  $R_5$ . Dengan kata lain Arus yang dihasilkan adalah perbandingan antara nilai tegangan terhadap  $R_5$ .



Gambar 5. Pengatur Tegangan Offset dan Rangkaian Penguat



Gambar 6. *Basic Howland Circuit*

### III. HASIL DAN ANALISIS

#### A. Pengujian Catu Daya

Catu daya diuji dengan menggunakan multimeter yakni dengan memberikan beban. Beban yang diberikan adalah 300 ohm – 1.5 Mohm. Gambar 7 berikut adalah hasil pengujian Catu Daya.

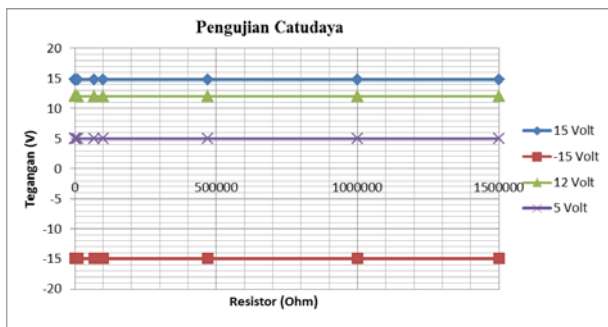
Hasil pengujian pada Gambar 7 menunjukkan bahwa catu daya bekerja cukup baik yakni bisa bekerja pada beban 300 ohm hingga 1.5 Mohm.

#### B. Pengujian Modul DDS AD9850

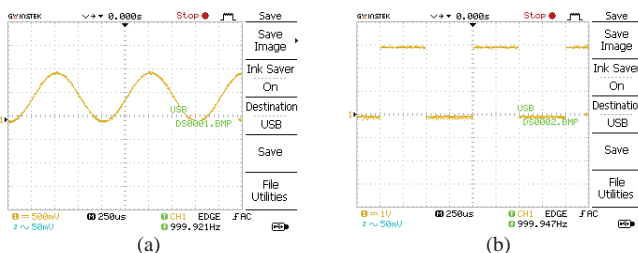
Pengujian Modul DDS AD9850 meliputi pengujian bentuk sinyal luaran, pengujian keakurasian frekuensi, respon frekuensi, dan *noise* yang terjadi. Pengujian yang dilakukan akan sangat penting karena DDS AD9850 menentukan kualitas sinyal sinusoidal ataupun persegi yang dihasilkan. Pengamatan tentang *noise* juga penting sehingga akan diperoleh batas maksimal dan minimal frekuensi yang bisa digunakan. Berikut adalah bentuk sinyal luaran dari AD9850 untuk frekuensi 1kHz.

Dapat dilihat dari hasil pengamatan osiloskop di atas (Gambar 8) sinyal yang dihasilkan masih dalam bentuk sinyal DC yakni hanya pada polaritas positif dalam fungsi waktu. Untuk membuat sinyal menjadi AC maka diperlukan *offset* untuk menurunkan sinyal hingga terdapat perbedaan polaritas. Sinyal sinusoidal memiliki tegangan sebesar 1Vpp dengan frekuensi sebesar 999,921 Hz dan sinyal persegi memiliki tegangan sebesar 3Vpp dengan frekuensi sebesar 999,947 Hz.

Pengujian selanjutnya yakni ketepatan nilai frekuensi. Gambar 9 menunjukkan grafik tentang ketepatan nilai frekuensi antara frekuensi set dan frekuensi yang diamati pada osiloskop. Hasil pengujian menunjukkan bahwa DDS AD9850 memiliki ketepatan yang tinggi yakni dengan error sebesar 0.0468636% untuk sinyal sinusoidal dan 0.0387956% untuk sinyal persegi.



Gambar 7. Hasil Pengujian Catu Daya



Gambar 8. Sinyal Luarannya AD9850 (a. Sinyal Sinus ; b. Sinyal Persegi)

#### C. Pengujian Sumber Arus

##### Konversi Tegangan ke Arus

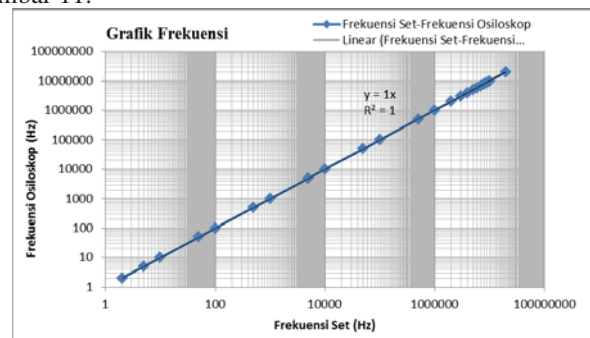
Sumber arus yang dirancang berbasis VCCS atau pengubah tegangan menjadi arus. Dengan demikian konversi tegangan ke arus juga perlu dikarakteristik. Untuk rangkaian Howland pada Gambar 10, setiap tegangan 0.909 Vpp diubah menjadi arus sebesar 1mA<sub>pp</sub> sesuai dengan perhitungan dan simulasi pada konfigurasi.

Besar arus yang mengalir pada beban diperoleh dari persamaan berikut,

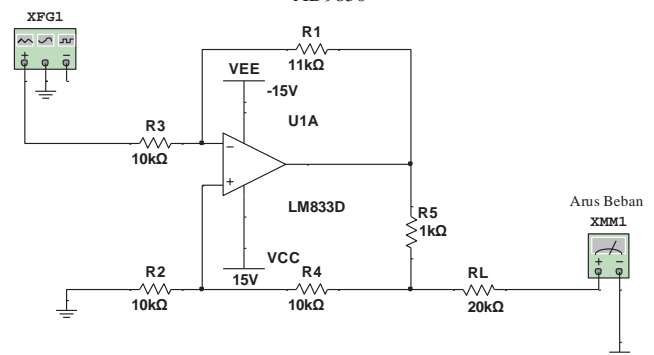
$$I_L = -\frac{1}{R_5} \left( \frac{R_1}{R_3} \right) V_{in} \quad (2)$$

Dengan mengatur besar  $R_5$  dengan 1kOhm, maka besar arus hanya tergantung dengan nilai  $R_1$  dan  $R_3$ . Pada rangkaian yang dirancang besar  $R_1 = 11k$ ,  $R_3 = 10k$ . Dengan demikian untuk 1Vpp akan diubah menjadi 1.1mA<sub>pp</sub> atau dengan 0.909Vpp menjadi 1mA<sub>pp</sub> dan berlaku untuk setiap kelipatan.

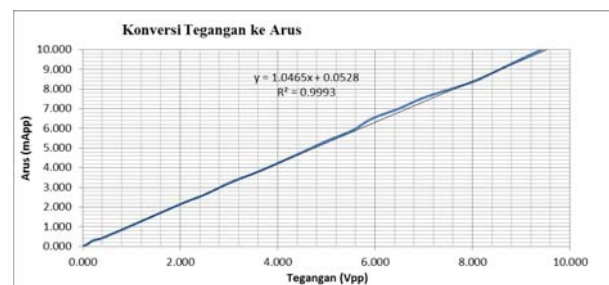
Hasil pengujian konversi tegangan ke arus bisa dilihat pada Gambar 11.



Gambar 9. Grafik Frekuensi Set dan Hasil Pengukuran Osiloskop AD9850



Gambar 10. Rangkaian Howland



Gambar 11. Grafik Hubungan Konversi Tegangan ke Arus



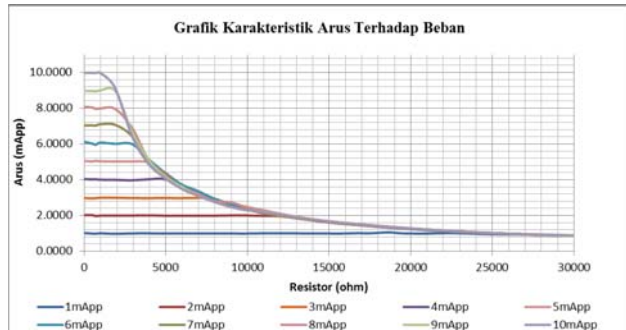
Dari Gambar 11 dapat diperoleh bahwa hubungan tegangan dan arus adalah linear dengan besar  $R^2 = 0.9993$ . Dengan besar  $R^2$  mendekati 1 maka hubungan keduanya bisa dianggap linear meskipun terjadi fluktuasi pada saat 5Vpp hingga 7Vpp. Dengan demikian performa VCCS cukup baik.

### Karakteristik Arus Terhadap Beban

Untuk mengetahui hubungan antara arus dan beban maka dilakukan pengujian untuk masing-masing besar arus terhadap beban yakni 10 Ohm - 20 kOhm. Arus dirubah yakni 1mApp, 2mApp, 3mApp, 4mApp, dan 10 mApp dengan frekuensi tetap yakni 1kHz. Frekuensi 1kHz ditentukan karena menginginkan karakteristik dari sumber arus tak terpengaruh oleh frekuensi. Frekuensi 1kHz dirasa cukup aman untuk pengujian variasi beban. Hasil pengujian hubungan dan karakteristik arus terhadap beban bisa dilihat pada Gambar 12 di bawah ini.

Untuk masing-masing besar arus yang diatur (1-10mApp) memiliki beban maksimum yang berbeda atau berkurang untuk setiap kenaikan besar arus. Nilai beban maksimumnya bisa dilihat pada Tabel 1.

Dari Gambar 12 bisa disimpulkan bahwa jangkauan beban akan berkurang untuk setiap kenaikan besar arus. Kondisi demikian bisa diamati dengan fenomena terpotongnya bentuk sinyal yang diukur pada beban. Hal ini terjadi karena pengaruh Op-Amp yang digunakan dalam konfigurasi Howland. Penguatan sinyal pada Op-Amp terbatas dengan nilai catuannya. Artinya tegangan output pada Op-Amp tidak akan lebih besar daripada selisih antar kedua kaki positif dan negatif. LM833 akan beroperasi dengan baik pada catuan +/- 9 Volt hingga +/-18 Volt.



Gambar 12. Karakteristik Arus Terhadap Beban

TABEL I  
BEBAN MAKSIMUM SUMBER ARUS

Amplitudo	Beban Maksimum	Arus Beban Maksimum	Arus Rata-Rata (<Zmax)	Standar Deviasi
1mApp	24.4k	0.9672	1.002	1.48%
2mApp	11.98k	1.9599	1.988	3.16%
3mApp	7.94k	2.9571	2.977	1.44%
4mApp	5.74k	3.952	3.976	2.37%
5mApp	4.31k	4.945	5.02	2.68%
6mApp	3.34k	5.95	6.03	5.85%
7mApp	2.76k	6.955	7.06	3.15%
8mApp	2.32k	7.95	8.00	4.88%
9mApp	1.902k	8.944	8.97	2.14%
10mApp	1.648k	9.942	9.97	0.42%

Pada sistem yang dirancang, setiap LM833 diberikan catuan sebesar +/-15 Volt. Dengan demikian tegangan atau sinyal yang dihasilkan pada kaki output akan selalu lebih kecil dari 30Vpp. Jika sinyal yang dihasilkan akan selalu lebih kecil dari 30Vpp, maka untuk besar arus 10mApp maka beban maksimumnya adalah 3k. Hal inilah yang paling berpengaruh terhadap fenomena penurunan amplitudo yang terjadi pada VCCS yang menggunakan Op-Amp sebagai komponen utamanya. Dari Tabel 1 bisa dilihat bahwa acuan penentuan nilai beban maksimum yakni berdasarkan fenomena terpotongnya sinyal sekaligus penurunan amplitudo maksimal 5% dari nilai pengaturan.

### Impedansi Luaran

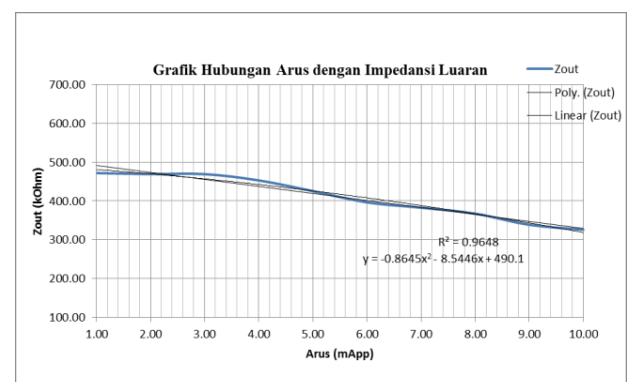
Dari hasil pengamatan dan pengujian respon pembebanan, ternyata jangkauan beban lebih kecil untuk setiap kenaikan amplitudo. Jika beban semakin besar maka jangkauan sumber arus juga semakin kecil. Dengan demikian kondisi tersebut juga berlaku pada perhitungan impedansi luaran. Perbandingan beban maksimum dan arus maksimum serta arus minimum dan beban minimum didapatkanlah nilai dari impedansi luaran. Tabel 2 menunjukkan hasil perhitungan impedansi luaran.

Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa rata-rata penurunan impedansi luaran sebesar 3.99% untuk setiap kenaikan 1mApp. Penurunan impedansi dihitung dengan persamaan di bawah ini.

$$\% \Delta Z_{out} = \frac{Z_n - Z_{n-1}}{Z_{n-1}} \times 100\% \quad (3)$$

TABEL II  
HASIL PERHITUNGAN IMPEDANSI LUARAN

Arus (mApp)	Zmin (Ohm)	Imin (mApp)	Zmax (Ohm)	Imax (mApp)	Zout (Ohm)
1.00	10.00	1.0200	24.4k	0.9672	466.910k
2.00	10.00	2.0200	11.98k	1.9599	469.188k
3.00	10.00	2.9800	7.94k	2.571	468.991k
4.00	10.00	4.0400	5.74k	3.952	452.882k
5.00	10.00	5.0500	4.31k	4.945	425.249k
6.00	10.00	6.1200	3.34k	5.95	396.236k
7.00	10.00	7.0400	2.76k	6.955	382.508k
8.00	10.00	8.0800	2.32k	7.95	367.264k
9.00	10.00	8.9800	1.902k	8.944	338.434k
10.00	10.00	9.9800	1.648k	9.942	325.692k



Gambar 13. Grafik Hubungan Arus dengan Impedansi Luaran

Gambar 13 menunjukkan hubungan arus dengan impedansi luaran. Pada rentang 1-10 mApp persamaan yang dihasilkan adalah persamaan polinomial  $y = -0.8645x^2 - 8.5446x + 490.1$  kOhm dengan x menunjukkan besar arus dan y adalah impedansi output.

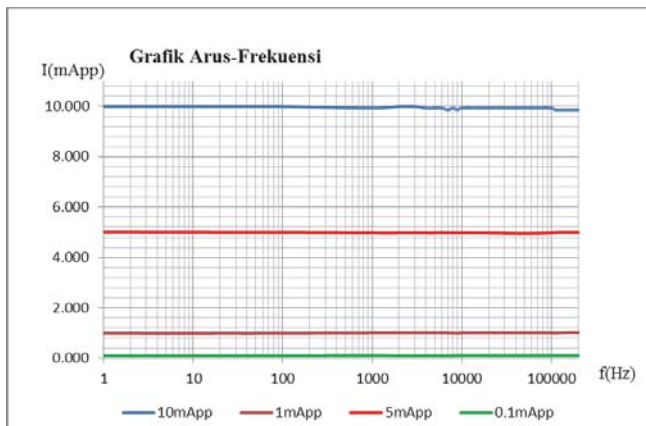
### Karakteristik Arus - Frekuensi

Untuk mengetahui performansi sumber arus pada variasi frekuensi yang berbeda maka dilakukan pengujian yakni dengan mengubah-ubah nilai frekuensi dari 1Hz-200kHz dan nilai beban tetap 1.5kOhm.

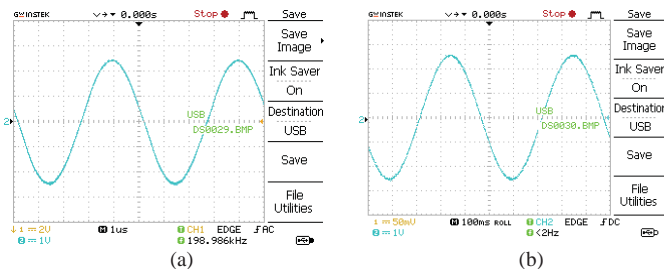
Gambar 14 menunjukkan grafik hubungan antara arus dan frekuensi pada saat beban sebesar 1.5k. Dapat dilihat bahwa frekuensi pada rentang 1Hz-200kHz tidak memiliki pengaruh terhadap nilai amplitudo pada saat percobaan dengan variasi amplitudo yang berbeda. Pada amplitudo 0.1 mApp nilai rata-rata yang terukur yakni 0.103 mApp dengan standar deviasi 0.24%. Pada 1mApp yakni 1.001 mApp (0.82%), 5mApp yakni 4.99 mApp (1.23%), 10 mApp yakni 9.94m mApp (5.64%). Besar standar deviasi yang masih dibawah 6% menunjukkan bahwa pengaruh frekuensi tidak terlalu signifikan pada rentang frekuensi 1-200kHz.

Gambar 15 di bawah ini merupakan hasil pengamatan osiloskop untuk frekuensi 2Hz, dan 198.9kHz.

Dari Gambar 15 bagian (a) frekuensi yang terbaca pada osiloskop adalah 198.986 Hz, dan bagian (b) frekuensi tidak terbaca karena *threshold* pembacaan pada osiloskop minimal 2Hz. Nilai frekuensi bisa dibaca melalui pembacaan 1 periode gelombang dengan menghitung besar time/div.



Gambar 14. Karakteristik Arus Terhadap Frekuensi



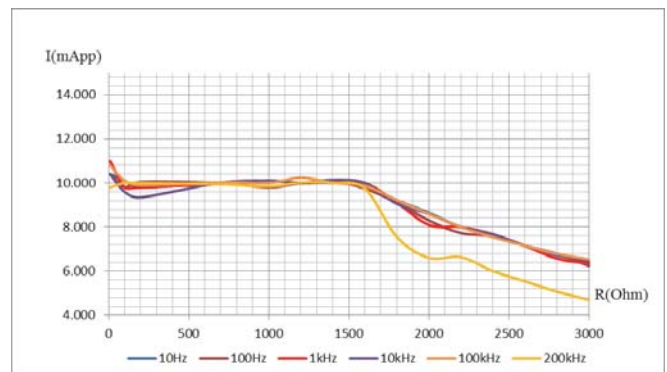
Gambar 15. Pengamatan Osiloskop (a) Frekuensi 198.9 kHz, (b) Frekuensi 2Hz

Setelah melakukan karakterisasi pada beban tetap, karakterisasi arus terhadap frekuensi selanjutnya yakni dengan mengubah nilai beban dari 1kOhm hingga 3kOhm dengan  $I = 10\text{mApp}$  untuk tiap frekuensi yang berbeda yakni 10Hz, 1kHz, 100kHz, dan 200kHz. Hal ini perlu dilakukan untuk melihat pengaruh respon frekuensi terhadap kenaikan beban. Beban yang akan diuji dibatasi hanya 1kOhm – 3kOhm karena pada saat  $I = 10\text{mApp}$  beban maksimal 1.648 kOhm.

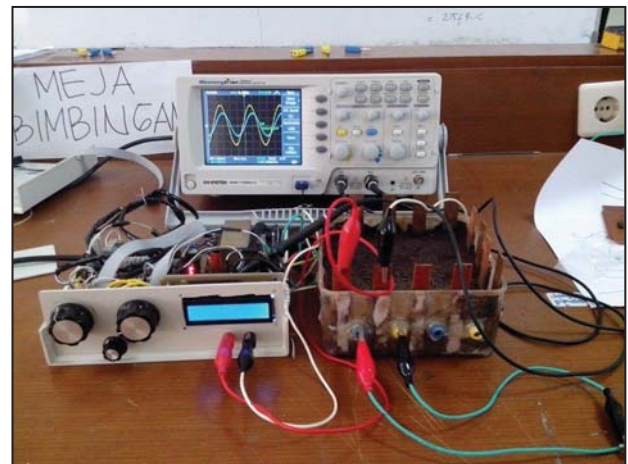
Gambar 16 menunjukkan grafik ketika beban diubah-ubah dari 10-3kOhm. Penurunan amplitudo terjadi pada saat resistor lebih besar 1.648kOhm untuk setiap frekuensi yang diatur.

### Pengujian Pada Objek EIT Homogen

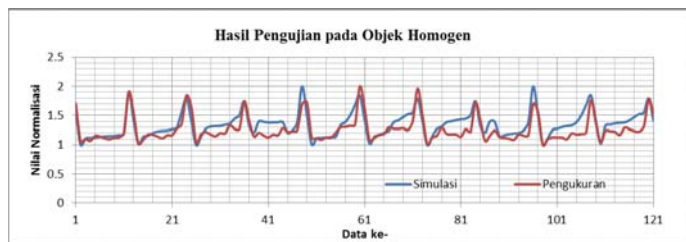
Pengujian dilakukan yakni dengan menginjeksikan arus sebagaimana prinsip EIT metoda injeksi arus. Objek EIT yakni tanah yang kondisinya homogen dengan ukuran 13x13 dengan 12 elektroda (hanya menggunakan 3 sisi) Dengan hanya 12 elektroda maka keseluruhan data yang diperoleh yakni 121.  $(n - 1)^2$  Arus yang diinjeksikan yakni 10mApp dengan frekuensi 100kHz. Metoda yang digunakan adalah jenis *adjacent*. Pengujian pada objek memiliki tujuan untuk memastikan bahwa sumber arus bisa digunakan pada EIT. *Setup* pengujian objek homogen bisa dilihat pada Gambar 17.



Gambar 16. Karakteristik Arus Terhadap Frekuensi



Gambar 17. Hasil pengujian pada Objek Homogen



Gambar 18. Hasil pengujian pada Objek Homogen

Hasil pengujian objek EIT bisa dilihat pada Gambar 18. Pada hasil pengujian bisa dilihat bahwa pola pada hasil pengukuran mendekati hasil dari simulasi. Namun pada pengujian objek homogen terjadi *error* sebesar 8.3%. Dengan demikian sumber sudah bisa digunakan pada EIT.

#### IV. KESIMPULAN

Penelitian tujuan yakni membuat sumber arus yang memiliki karakteristik yang nilai arus yang konstan, presisi, impedansi keluaran yang tinggi, *portable*, *adjustable*, mudah digunakan dan terkalibrasi untuk injeksi arus pada EIT. Tujuan yang kedua yang tak kalah penting yakni mendapatkan karakteristik sumber arus sehingga bisa digunakan pada objek dengan kondisi yang berbeda-beda. Sumber arus yang dirancang berbasis VCCS yakni merubah tegangan menjadi arus untuk setiap 0.909 Vpp menjadi 1 mApp. Sumber tegangan yakni sinyal generator yang bekerja menggunakan prinsip DDS dengan AD9850 berbasis Arduino. Sumber arus memiliki impedansi luaran yang berubah untuk setiap kenaikan amplitudo. Rentang Amplitudo sumber arus yakni 0.1mApp – 10mApp. Pada Amplitudo 1 mApp beban maksimum yang bisa diterapkan sebesar 24.4k dengan rata-rata besar arus yang terukur 1.002 (1.48%) mApp. Pada amplitudo 10 mApp beban maksimum sebesar 1.648k dengan rata-rata besar arus yang terukur 9.97 (0.42%). Jadi sumber arus masih bekerja dengan baik pada beban maksimum 1.648k untuk setiap amplitudo. Rentang Frekuensi sumber arus yakni 1Hz-200kHz untuk setiap amplitudo. Pada 1mApp memiliki

standar deviasi sebesar (0.82%) sedangkan pada 1mApp naik menjadi (5.64%). Sumber arus yang berhasil dirancang menawarkan fitur yang lain yakni sinyal persegi. Sumber arus juga dilengkapi moda pengaturan amplitudo, *offset*, dan frekuensi. Pengaturan amplitudo dan *offset* menggunakan potensiometer. Pengaturan frekuensi menggunakan rotary encoder switch dan untuk tampilan digunakan LCD 16x2. Sumber arus juga diuji pada objek EIT. Pada pengujian Objek EIT homogen, hasil yang didapatkan memiliki *error* 7.6% dengan pola yang mirip dengan hasil simulasi.

#### REFERENSI

- [1] Li Y., Rao L., He R., Xu G., Wu Q., Yan W., Dong G. and Yang Q., A Novel Combination Method of Electrical Impedance Tomography Inverse Problem for Brain Imaging, IEEE Transactions on Magnetics, 41(5), (2005), pp. 1848-1851.
- [2] H. Hong, M. Rahal, A. Demosthenous and R. H. Bayford, Floating Voltage-Controlled Current Sources for Electrical Impedance Tomography, In Proceedings of the 18th European Conference on Circuit Theory and Design, 2007. ECCTD 2007, (2007), pp. 208-211.
- [3] T. K. Bera and N. Jampana, A Multifrequency Constant Current Source Suitable for Electrical Impedance Tomography (EIT), In Proceedings of International Conference on Systems in Medicine and Biology, December (2010), pp. 278-283.
- [4] D. Zhao, High output-impedance current source for electrical impedance tomography, In Proceedings of the 4th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), IEEE, (2011), pp. 1106-1109.
- [5] Zarafshani, A., Huber, N., Bégo, B., Tunstall, G., Sze, C Chatwin. "A Flexible Low-Cost, High-Precision, Single Interface Electrical Impedance Tomography System for Breast Cancer Detection Using FPGA". Biomedical Engineering, School of Engineering and Design, University of Sussex, Brighton BN1 9QT, UK. 2008.
- [6] Darmawan, D., Kurniadi, D., Boundary Potential Distribution in Rectangular Object based on Current Injection Pattern, Jurnal. 2013.
- [7] Petchmaneeumka, W., Rerktratn, A., Kaewpoonsuk, A. Digitally Programmable AC Current Source. IMECS. 2009.
- [8] Dezhi, X., Caicheng, D. Study and Realization of a Signal Generator Based on the DDS Technology. Dianzikeji Electronic Science and Technology. 2010.
- [9] Qureshi, T.R., Chatwin C.R., Wang, W. Design of Wideband Voltage Source Having Low Output Impedance, Flexible Gain and Controllable Feedback Current for EIT Systems. Biomedical Engineering, University of Sussex, Brighton, United Kingdom. 2012.

